

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2003-295143

(43)Date of publication of application : 15.10.2003

(51)Int.Cl.

G02F 1/061

G02B 6/12

G02F 1/01

G02F 1/313

(21)Application number : 2002-094047

(71)Applicant : HITACHI LTD

(22)Date of filing : 29.03.2002

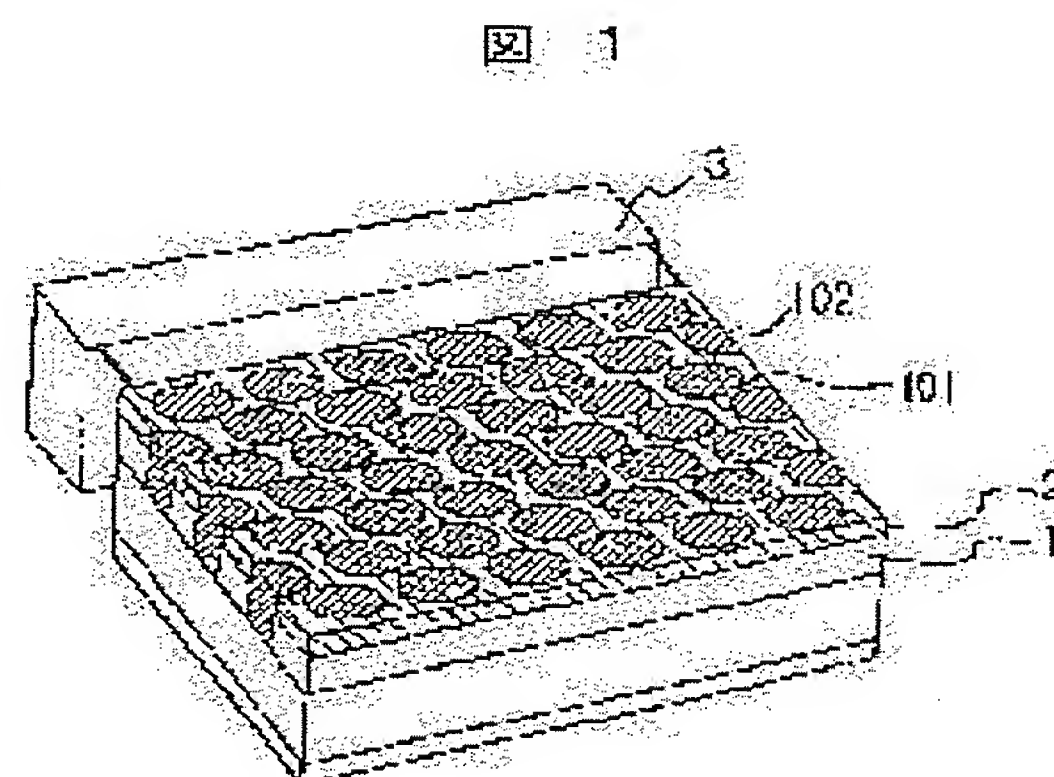
(72)Inventor : HOSOMI KAZUHIKO  
KATSUYAMA TOSHIO  
RI EIKON

(54) OPTICAL FUNCTION ELEMENT AND METHOD OF MANUFACTURING THE SAME

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To materialize a photonic crystal with which a sufficiently large change in refractive index is obtainable with a relatively simple constitution and to provide an optical function element using the same, and a method of manufacturing the same.

SOLUTION: Polymers are used for at least one of the materials of the photonic crystal and the refractive index of the photonic crystal is changed by changing the temperature of such polymers, by which the band structure of the photonic crystal is controlled. The polymers 102 are embedded into pores 101 formed at the two-dimensional photonic crystal 1 and are heated by a thin-film heater 2 or are cooled by a Peltier element. The temperature is regulated and controlled by a temperature regulator 3.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 25.03.2004

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration] withdrawal

[Date of final disposal for application] 16.05.2005

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2003-295143

(P2003-295143A)

(43)公開日 平成15年10月15日(2003.10.15)

(51)Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テームト* (参考)	
G 0 2 F 1/061	5 0 5	G 0 2 F 1/061	5 0 5	2 H 0 4 7
G 0 2 B 6/12		1/01	F	2 H 0 7 9
G 0 2 F 1/01		1/313		2 K 0 0 2
1/313		G 0 2 B 6/12	Z	
			N	
審査請求 未請求 請求項の数10 O L (全 12 頁)				

(21)出願番号 特願2002-94047(P2002-94047)

(22)出願日 平成14年3月29日(2002.3.29)

(71)出願人 000005108  
株式会社日立製作所  
東京都千代田区神田駿河台四丁目6番地  
(72)発明者 細見 和彦  
埼玉県比企郡鳩山町赤沼2520番地 株式会  
社日立製作所基礎研究所内  
(72)発明者 勝山 俊夫  
埼玉県比企郡鳩山町赤沼2520番地 株式会  
社日立製作所基礎研究所内  
(74)代理人 100068504  
弁理士 小川 勝男 (外2名)

最終頁に続く

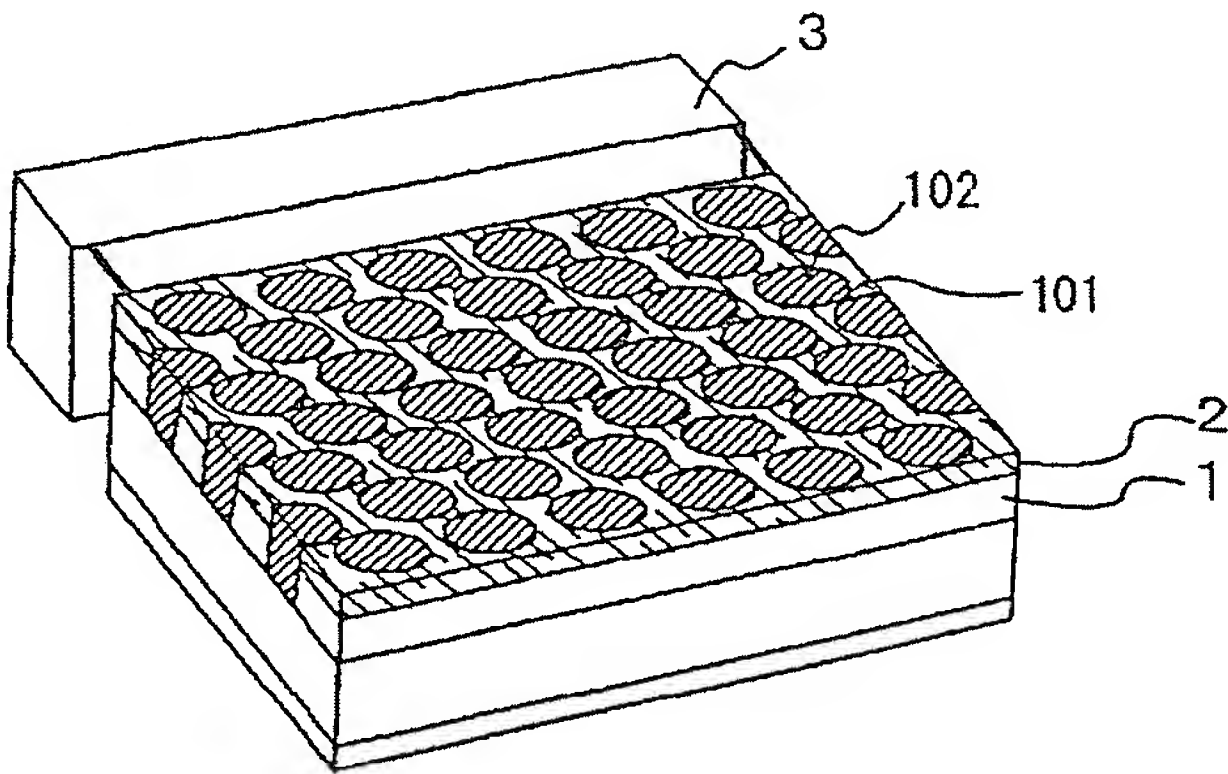
(54)【発明の名称】 光機能素子及びその製造方法

(57)【要約】

【課題】比較的簡単な構成で、十分大きな屈折率変化が得られるフォトニック結晶を実現し、それを用いた光機能素子及びその製造方法を提供する。

【解決手段】フォトニック結晶の材質の少なくとも一つにポリマーを用い、かかるポリマーの温度を変化させることによりフォトニック結晶の屈折率を変化させ、フォトニック結晶のバンド構造を制御するよう構成する。二次元フォトニック結晶1に形成した孔部101にポリマー102を埋め込み、これを薄膜ヒーター2で加熱、あるいはペルチエ素子で冷却する。温度は、温度調整器3で調整、制御する。

図 1



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】屈折率の異なる二種類以上の材料を周期的に配列した構造を有し、前記二種類以上の材料の少なくとも一つがポリマーからなり、かつ前記ポリマーの少なくとも一部分の温度を変化し得るよう構成したことを特徴とする光機能素子。

【請求項 2】フォトニック結晶を有する光機能素子にあって、前記フォトニック結晶の材質の少なくとも一つにポリマーを用い、前記ポリマーの温度を変化させることにより前記フォトニック結晶の屈折率を制御するよう構成したことを特徴とする光機能素子。

【請求項 3】前記ポリマーは、加熱されると可塑性が増す性質を有する種類のポリマーで構成されていることを特徴とする請求項 1 又は 2 記載の光機能素子。

【請求項 4】前記周期構造が、少なくとも二種類の薄膜を積層した積層薄膜構造であって、かつ前記薄膜の少なくとも一種類がポリマーであることを特徴とする請求項 1 記載の光機能素子。

【請求項 5】前記周期構造が、基板に略垂直に伸びた柱状構造を有する第 1 の誘電体物質と、前記柱状構造を埋める第 2 の誘電体物質とで構成された二次元周期構造であり、かつ前記第 1 誘電体物質がポリマーであることを特徴とする請求項 1 記載の光機能素子。

【請求項 6】前記周期構造が、基板に略垂直に伸びた柱状構造を有する第 1 の誘電体物質と、前記柱状構造を埋める第 2 の誘電体物質とで構成された二次元周期構造であり、かつ前記第 2 の誘電体物質がポリマーであることを特徴とする請求項 1 記載の光機能素子。

【請求項 7】前記ポリマーの温度変化を、前記周期構造上に配設した薄膜ヒーターを用いて行うよう構成したことを特徴とする請求項 1 又は 2 記載の光機能素子。

【請求項 8】前記ポリマーが、フッ素化ポリイミドで構成されることを特徴とする請求項 1 又は 2 記載の光機能素子。

【請求項 9】前記周期構造が、点欠陥導波路およびまたは線欠陥導波路を有する構造であることを特徴とする請求項 1 記載の光機能素子。

【請求項 10】基板上に周期的に配列した複数個の孔部を形成する工程と、前記基板上に前記複数個の孔部を除き金属薄膜層を形成する工程と、前記複数個の孔部にポリマー前駆体を充填する工程とを有してなることを特徴とする光機能素子の製造方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、分散補償器、光スイッチ、波長分離素子、光遅延素子などとして用いられる光機能素子に関する。

## 【0002】

【従来の技術】近年、従来の素子では不可能だった光の制御を可能とする材料として、フォトニック結晶が大き

な関心を集めている。フォトニック結晶とは、屈折率の異なる二つあるいはそれ以上の数の媒質を組み合わせた多次元周期構造のことである。

【0003】図 2 に示すのは、フォトニック結晶のうち、二次元フォトニック結晶と呼ばれるものの一例である。図 2 は、紙面と水平方向には周期構造を有し、垂直方向の構造は一様な構造の断面図である。誘電率  $\epsilon_1$  の媒質に誘電率  $\epsilon_2$  の円柱が三角格子状に配置されている ( $\epsilon_1 > \epsilon_2$ )。円柱の部分が空洞の場合は、 $\epsilon_2 = 1$  である。図 2 中、 $a$  は格子定数、 $r$  は円柱の半径を表す。

【0004】フォトニック結晶を伝播する光の波数と周波数の関係を示した図をフォトニックバンド図という。図 3 は、図 2 の構造において、 $\epsilon_1 = 3.5$ 、 $\epsilon_2 = 1$ 、 $r/a = 0.45$  としたときの TM モード (Transverse Magnetic Mode) に対するフォトニックバンド図である。ここで、TM モードとは電場が紙面と垂直のモードのことを指す。縦軸は規格化周波数 ( $\omega a / 2\pi c$ )、横軸は第一ブリルアンゾーン内で規格化した波数ベクトル ( $ka / 2\pi$ ) を表す。 $c$  は真空中の光速、 $\omega$  は光の角周波数、 $k$  は波数をそれぞれ表す。図 2 の三角格子は六方対称に対応し、形成されるブリルアンゾーンは図 3 中に図示する正六角形構造である。正六角形の頂点が K 点、各辺の中点が M 点、波数が 0 である点が  $\Gamma$  点である。

【0005】図 3 中に斜線で図示するように、特定の (規格化) 周波数領域では第一ブリルアンゾーン全域に渡ってバンドが存在しない。これは、この帯域に対応する周波数の光はフォトニック結晶中を伝播できないことを意味する。このような、伝播が禁止された周波数帯域をフォトニックバンドギャップと呼ぶ。このフォトニックバンドギャップを利用すると、従来の素子では不可能であった光の制御が可能とされ注目を集めている。また、フォトニック結晶を透過する光の特徴は、バンドギャップだけではなく、図 3 に示されるように、特有の複雑な分散特性を示すことが知られている。

【0006】このような特徴をもつフォトニック結晶は、様々な分野への応用が期待されているが、特に光部品への応用を目的とした研究が盛んである。二次元フォトニック結晶中に線状あるいは点状の欠陥を導入し、導波路や他の光機能素子を作製すると、小型化・高性能化に著しい効果があるとされており、現在までに様々な素子が提案・研究されている。

【0007】例えば、特開平 11-271541 号公報には、フォトニック結晶を用いた波長分波回路の例が示されている。この素子に於いては、基板に二次元フォトニック結晶を形成し、その屈折率分散の異方性を利用して、波長多重された光パルスに分波する。

【0008】特開 2000-121987 号公報では、波長分散補償器の例が開示されている。この素子は、フォトニック結晶の特性を利用して、光伝送路中でのパルス波形の劣化を補償するものである。図 3 に示すような



複雑な分散曲線の波長分散の傾きの大きな領域、つまり波長分散の大きな領域を利用することで、コンパクトな分散補償素子が提供できるとしている。

【0009】また、最近フォトニック結晶中に点欠陥を設けて微小共振器とし、この微小共振器を一定間隔で配置して導波路とする、いわゆる結合微小共振器導波路が注目を集めている。結合微小共振器の特性に関しては、例えば、「オプティクス・レターズ(Optics Letters)、第24巻、711頁」に示されている。このタイプの導波路は、透過する光の群速度が波長によって大きく異なり、しかも絶対値が小さいのが特徴で、分散補償器や遅延回路への応用が期待される。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】光スイッチや強度変調器などの光機能素子では、材質の屈折率・反射率その他物理定数を、外部からの電圧印加などによって変化させることにより、光の伝搬を制御する。

【0011】フォトニック結晶を用いる場合も同様で、素子に機能性を持たせるためには物性定数の外部からの制御が重要となる。フォトニック結晶の性質を決定する物性定数は、材質の屈折率(差)、基本構造の格子定数であるが、格子定数を変化させることは一般に非常に困難である。従って材質の屈折率を制御することが、フォトニック結晶光機能素子を実現するためには重要な課題となる。

【0012】一方、光機能素子以外のフォトニック結晶を用いた素子でも、材料物質の屈折率の可変制御は重要な意味を持つ。一般にフォトニック結晶素子で所望の性能を得るためには、その結晶を構成する個々の微細構造を非常に高精度で作製することが必要となり、作製精度の許容誤差が極端に小さい。そこで、フォトニック結晶自体に可変性を持たせ、作製後に所望の値へとチューニングする技術が重要となる。

【0013】以上説明した如く、フォトニック結晶に於いて屈折率の可変制御技術は本質的に重要で、特に光機能素子への応用には必須の技術である。フォトニック結晶の材料の組み合わせとしては、高屈折率媒質にはシリコン(Si)や砒化ガリウム(GaAs)等の半導体、低屈折率媒質には空気やSiO<sub>2</sub>を用いるのが一般的である。屈折率変化を得るためには、例えば、半導体への電界印加が考えられる。しかしその場合、効果的な電界印加のためには、複雑な電極構造が必要となると考えられる。また光機能素子を構成するほどの屈折率変化を得ようとすると、極めて大きな電圧を印加する必要がある。

【0014】また、屈折率変化を得る他の方法としては、上述した特開2000-121987号公報の実施

例に開示されているように、半導体の熱光学効果を利用して屈折率制御を得る方法もある。しかしながら、この方法も、開示されている素子形態で有効な屈折率変化を得ようとすると大きく温度を変化させる必要があり、実現が難しい。

【0015】従って、比較的簡単な構成で、大きな屈折率変化を得る方法が求められている。

【0016】本発明の目的は、比較的簡単な構成で、十分大きな屈折率変化が得られるフォトニック結晶を実現し、それを用いた光機能素子及びその製造方法を提供することにある。

【0017】

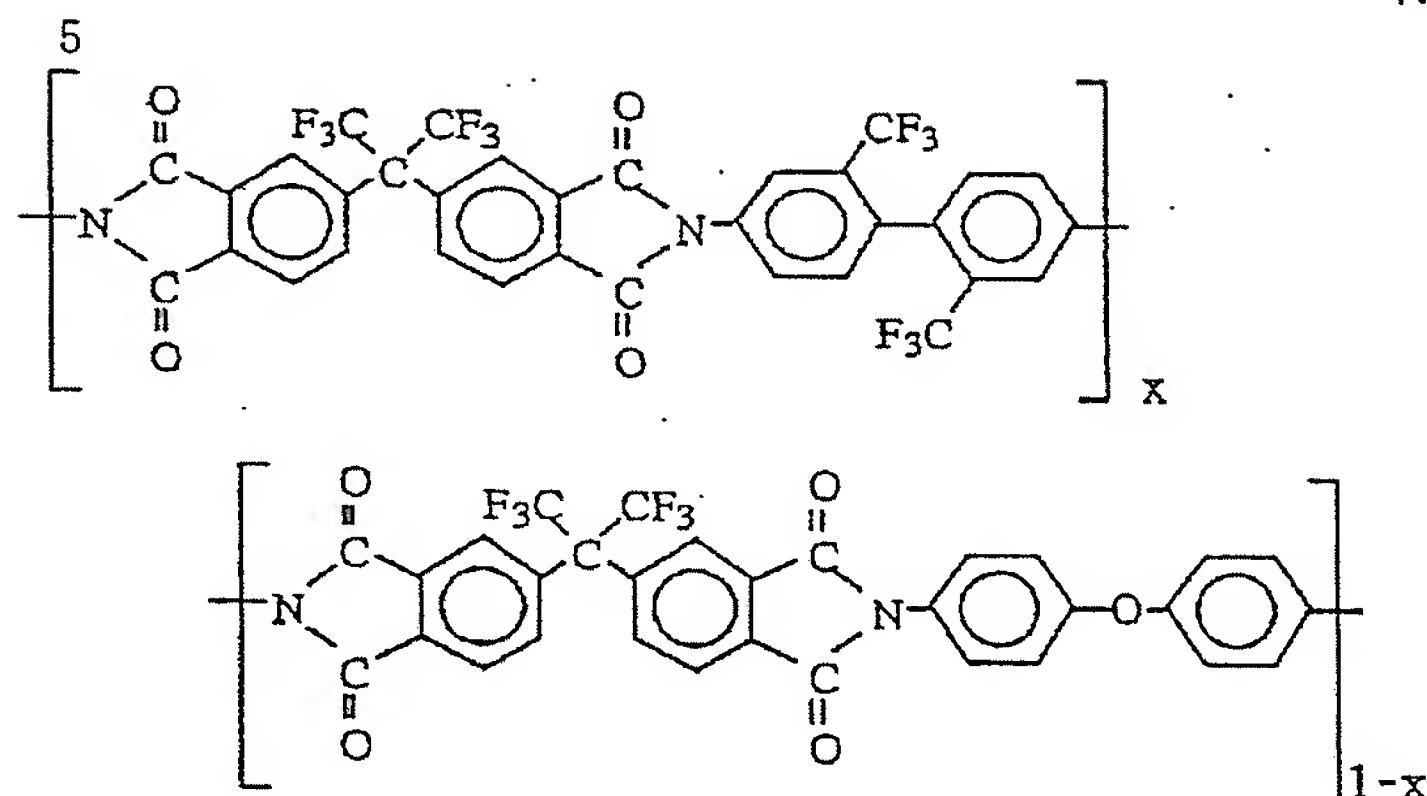
【課題を解決するための手段】上記目的を達成するために、本発明による光機能素子は、フォトニック結晶の材質の少なくとも一つにポリマーを用い、かかるポリマーの温度を変化させることにより前記フォトニック結晶の屈折率を変化させ、フォトニック結晶のバンド構造を制御するよう構成する。

【0018】例えば、図1に概念図を示すように、半導体と空気で作製した二次元フォトニック結晶1に形成した孔部101にポリマー102を埋め込み、これを薄膜ヒーター2で加熱する。温度は、温度調整器3で調整、制御する。この例ではポリマーを加熱する場合を示したが、冷却する場合には、例えばペルチェ素子を用いて行う。

【0019】ポリマー材料は一般に、温度とともに屈折率が大きく変化するという性質を持つ。ポリマー材料としては、光透過性に優れた、ポリメタクリルレート(PMMA)、ポリカーボネイト(PC)、ポリイミド等が挙げられる。特にポリイミドはガラス化転移温度が300度以上と耐熱性に優れているので、加熱して屈折率を変化させる場合、大きな屈折率変化を得ることができる。図4にポリイミドの屈折率の温度依存性を示す。温度による屈折率変化の程度は熱光学(TO)係数 $dn/dT$ で表されるが、図4において、TO係数はグラフの傾きで表される。ポリイミドのTO係数は $-3 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 程度で、その絶対値は屈折率がほぼ同じシリカ(SiO<sub>2</sub>)のTO係数より一桁程度大きい。また、Si等の半導体とTO係数の符号が逆なので、一緒に加熱するとポリイミドは屈折率が減少する一方、Siは屈折率が増大し、比較的小さな温度変化で大きな屈折率差の増大が得られる。ポリイミドとして具体的には、例えば下記の化学式で表されるポリイミドが挙げられる。

【0020】

【化1】



ポリマーを材料に用いた場合の他の特徴として、作製の容易さが挙げられる。ポリマーの薄膜は、基板にポリマーの前駆体を塗布・ベーキングすることで形成される。フォトニック結晶の材料としてポリマーを用いる場合は、予め加工を施した基板にポリマー前駆体を塗布し、これをベーキングすることで、ポリマーを埋め込んだフォトニック結晶を容易に作製することができる。

【0021】以下、本発明の代表的な構成例を挙げる。

【0022】本発明による光機能素子は、屈折率の異なる二種類以上の材料を周期的に配列した構造を有し、前記2種類以上の材料の少なくとも一つがポリマーからなり、かつ前記ポリマーの少なくとも一部分の温度を変化し得るよう構成したことを特徴とする。

【0023】また、本発明による光機能素子は、フォトニック結晶を有する光機能素子にあって、前記フォトニック結晶の材質の少なくとも一つにポリマーを用い、前記ポリマーの温度を変化させることにより前記フォトニック結晶の屈折率を制御するよう構成したことを特徴とする。

【0024】また、本発明による光機能素子は前記ポリマーは、加熱されると可塑性が増す性質を有する種類のポリマーで構成されていることを特徴とする。

【0025】また、本発明による光機能素子は、前記周期構造が、少なくとも二種類の薄膜を積層した積層薄膜構造であって、かつ前記薄膜の少なくとも一種類がポリマーであることを特徴とする。

【0026】また、本発明による光機能素子は、前記周期構造が、基板に略垂直に伸びた柱状構造を有する第1の誘電体物質と、前記柱状構造を埋める第2の誘電体物質とで構成された二次元周期構造であり、かつ前記第1誘電体物質がポリマーであることを特徴とする。

【0027】また、本発明による光機能素子は、前記周期構造が、基板に略垂直に伸びた柱状構造を有する第1の誘電体物質と、前記柱状構造を埋める第2の誘電体物質とで構成された二次元周期構造であり、かつ前記第2の誘電体物質がポリマーであることを特徴とする。

【0028】また、本発明による光機能素子は、前記ポリマーの温度変化を、前記周期構造上に配設した薄膜ヒーターを用いて行うよう構成したことを特徴とする。

【0029】また、本発明による光機能素子は、前記ポリマーが、フッ素化ポリイミドで構成されることを特徴とする。

【0030】また、本発明による光機能素子は、前記周期構造が、点欠陥導波路およびまたは線欠陥導波路を有する構造であることを特徴とする。

【0031】さらに、本発明は、基板上に周期的に配列した複数個の孔部を形成する工程と、前記基板上に前記複数個の孔部を除き金属薄膜層を形成する工程と、前記複数個の孔部にポリマー前駆体を充填する工程とを有してなることを特徴とする光機能素子の製造方法を提供する。

【0032】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施例について、図面を参照して詳述する。

【0033】（実施例1）図5は、本発明による一実施例の概念図である。本実施例は、結合微小共振器導波路の光の伝搬特性を利用した可変分散補償器である。可変分散補償器は、光パルス伝送路における伝送媒体が持つ波長分散によって引き起こされるパルス波形の劣化を、補償する素子である。本例の素子は、SOI（Si on insulator: Si/SiO<sub>2</sub>/Siの積層構造）基板上に形成されたポリマー埋め込みフォトニック結晶1、薄膜ヒーター2、ヒーターに電力を供給する温度調整器3、入・出力用導波路4、5から構成される。

【0034】フォトニック結晶部分の構造を、図6に示す。図示される二次元フォトニック結晶の構造は、図2に示すものと同じ円孔三角格子配列で、格子間隔aは0.600 μm、円孔の半径rは0.27 μmとした。結晶中には導波路として、点欠陥の列、即ち結合欠陥導波路が設けられている。点欠陥は、一般には、孔の大きさを変えたり屈折率を変えることで導入されるが、ここでは孔の径を0に、即ち一部分に孔を開けないことで欠陥6を導入した。欠陥列の、欠陥の周期Λは格子間隔の四倍、方向はΓ-M方向である。この欠陥列が結合微小共振器導波路を形成し、分散補償導波路として作用する。フォトニック結晶部の長手方向の長さは10 mmである。

【0035】図7は、図5中に示すPP'線分での断面図を示したものである。Si基板12に、SiO<sub>2</sub>層11、Si

20

30

40

50



層10が順次積層されてSOI構造9をなしている。Si層10の上部には薄膜ヒーターとなる厚さ0.5μmのCr層8が形成されている。Si層10とCr層8にはフォトリソニック結晶を構成するため所定の周期構造で孔が穿たれており、孔にはポリイミド7が充填されている。

【0036】ポリイミド7の具体的構造としては、前記化学式で表される2,2'-ビス(3,4-ジカルボキシフェニル)ヘキサフルオロプロパン二無水物(6FDA)と、2,2'-ビス(トリフルオロメチル)-4,4'-ジジアニノビフェニル(TFDB)又は4,4'-オキシジアニリン(ODA)から合成されるフッ素化ポリイミドを挙げることができる。このポリイミドではTFDBとODAの比を変化させることで、屈折率を調整することができるが、本実施例では6FDA/TFDBのみで構成(即ちx=1)されたフッ素化ポリイミドを用いた。SiO<sub>2</sub>層11の層厚は3μm、Si層10の層厚は0.5μmである。

【0037】ポリマーは熱せられるとその体積が膨張し、その膨張に伴って屈折率が小さくなる。従ってポリマー埋め込み構造を形成する際には、その膨張を妨げないような構造にする必要がある。本実施例の構造のように、円孔にポリマーを埋め込む構造では、上部を電極で完全に覆ってしまうとポリマーが膨張できず、十分な屈折率変化が得られない。従って、本例の如くポリマー上部を薄膜ヒーターが完全に覆わない構造にすることが重要である。

【0038】次に、フォトリソニック結晶欠陥導波路の製造方法を、図8の(a)から(g)を参酌して説明する。

【0039】図8(a)に示されるように、基板にはSOI基板9を用いた。SOI基板は下地Si層12、厚さ3μmのSiO<sub>2</sub>層11、厚さ0.5μmのSi層10から成る。

【0040】まず、図8(b)に図示するように、基板に電子線リソグラフィーによって厚さ1μmのレジストパターン13を形成した。次に、図8(c)に示すように、膜厚0.5μmのCr層8をスパッタリングによって \*

$$D = d/d\lambda (1/V_g)$$

ただし、 $V_g = d\omega/dk = \Lambda \Omega (\kappa^2 - (\omega/\Omega - 1)^2)^{1/2}$

ここで、 $\Lambda$ は共振器間の距離、 $\Omega$ は個々の共振器(点欠陥)の共鳴角周波数、 $\omega$ は結合共振器導波路を伝搬する光の角周波数を表す。 $\kappa$ は共振器同士の相互作用の強さに関わる量で、共振器の構造、共振器間の距離などによって決定される定数である。

【0046】 $\Lambda$ 、 $\Omega$ 、 $\kappa$ は構造によって決まる定数なので、結局、 $D$ は $\omega$ の関数となる。 $\omega$ は光の波長に対応する量なので、導波路の構造が与えられた場合、分散量 $D$ は波長の関数として表される。 $\Lambda$ の値は幾何的に決まり、図5に示す構造では、 $4a$ である。 $\Omega$ は平面波展開法より $0.38964 \times 2\pi c/a$ と計算された。これは波長に直すと1550nmに対応する。 $\kappa$ の値は、測定し

\*形成した。この状態で、レジストパターン13を除去すると、レジスト上のCr膜はレジストと一緒に剥離され、図8(d)に示すように、Si層10上に直接積層したCrだけが残る。このようにして、最初のレジストパターンの反転像のCr膜が転写された。

【0041】以上、いわゆるリフトオフプロセスによって、Cr層パターン8を形成することができた。次に、このCr層パターン8をマスクとして反応性イオンエッチングを用いて、図8(e)に示すようにSi層10をエッチングした。

【0042】次に、ポリイミドの前駆体であるポリアミド酸のN,N-ジメチルアセトアミド溶液をスピンコートにより塗布する。このとき、塗布の量を調節することだけで、ポリイミド膜を調節するのは難しいので、所望の量より厚めに形成し、エッチングで削って充填量を調整する。

【0043】また、微細な孔に原料を隙間なく充填する必要があるが、原料の粘度が大きすぎると、図9に図示するように、壁面からの盛り上がりによって底面に原料が充填されない恐れがある。このような現象を防ぐため、原料が孔の壁面と作る接触角 $\theta_0$ が、孔の直径 $d$ と孔の高さ $h$ が作る角度 $\theta = \tan^{-1}(d/h)$ よりも小さくなるようにその粘度を調節した。

【0044】このようにして、ポリマー前駆体を充填した後、一度真空引きして、空気の泡を取り除いた。その後、加熱してイミド化を行い、図8(f)に示すようにポリイミド層7を形成した。最後に、酸素を用いた反応性イオンエッチングで、過剰なポリイミドをエッチングして、図8(g)に示すような、ポリイミドの埋め込み構造を作製した。Si層10をエッチングする際にマスクとして用いたCr膜8は剥離せず、そのまま薄膜ヒーターとして用いる。

【0045】次に、本素子の分散を補償する具体的動作に関して説明する。結合微小共振器導波路の分散量 $D$ は、以下の式(1)で与えられる。

$$\dots\dots\dots (1)$$

た群速度を計算式にフィッティングすることで決定した。得られた $\kappa$ の値は-0.004であった。

【0047】このようにして得られた分散保証能力を、図10に示す。縦軸は素子1mmあたりの分散量、横軸は波長を示している。例えば1546nmの波長の光に対して本素子は、約20ps/nm/mmの分散補償能力を持つ。

【0048】次に分散補償量の可変動作について説明する。電極2に通電しポリマー及びSiを加熱したとき、高屈折率媒質であるSiの屈折率は増大する。一方、低屈折率媒質のポリイミドの屈折率は減少する。このように、加熱することで両媒質の屈折率差が大きくなる。この結果、フォトリソニック結晶の構造が変化し、点欠陥がつくる

微小共振器の共鳴周波数、即ち上述の式(1)中の $\Omega$ の値が変化する。

【0049】図11は、屈折率差が変化することで共鳴周波数 $\Omega$ が変化する様子を、波長単位で示したものである。横軸に示す $n_h$ 、 $n_l$ は、それぞれ高屈折率媒質と低屈折率媒質の屈折率を表す。このような共鳴波長の変化は、波長と分散量の関係にも変化をもたらす。図10は共鳴波長が1550nmの場合のグラフであったが、共鳴波長が長は超過すると、曲線が長波長方向へ平行移動することになる。

【0050】従って、同一波長の光に対しては分散量は増大する。ポリイミドとSiのTO係数を考慮して、1550nmの光の分散量の温度変化依存性を示したのが、図12である。このように温度を制御することで所望の分散量が得られることがわかる。例えば $\Delta T$ を70度とすることで、素子1mmあたり約15ps/nmの分散が得られる。素子の全長は10mmなので素子全体で約150ps/nmの可変幅を持つことになる。このように、比較的小さな温度変化で、従って低消費電力で、可変分散補償が実現できる。

【0051】以上、可変分散補償器の構成例を示したが、同様に結合微小共振器導波路を透過する光の性質を利用した素子形態として、可変光遅延器を構成しても、コンパクトで高性能な素子可以实现できる。

【0052】(実施例2)図13は、本発明による他の実施例を示す概念図である。本実施例は、二次元フォトニック結晶線欠陥導波路と微小共振器を組み合わせた空間光スイッチである。素子はポリマー埋め込みフォトニック結晶1と、Cr薄膜ヒーター6と入・出力用導波路23~26から構成される。二次元フォトニック結晶の構造は、実施例1に例示したものと同一である。

【0053】本実施例では、フォトニック結晶中の導波路として、線欠陥20、21が設けられている。二本の線欠陥導波路は $\Gamma$ -M方向に沿って孔を一列欠損させることにより導入した。また、二本の線欠陥導波路の間に点欠陥22を設けた。点欠陥22は特定の波長に対して微小共振器として働き、その共振波長の光のエネルギーを一方の導波路から他方の導波路へ伝搬させる働きをする。最表面のCr層は電源につながれており、電流を流すことで発熱する。図13では電源が省略してある。

【0054】本素子の動作について説明する。本素子では、入力ポート①23あるいは入力ポート②24から光信号を入射し、出力ポート①25あるいは出力ポート②26のいずれかから取り出す。どちらのポートから取り出すかを、薄膜ヒーターによる温度コントロールで制御する。

【0055】実施例1で説明した通り、加熱しない状態では、点欠陥22の共振波長は1550nmである。従って、入力ポート①23から入射され線欠陥導波路①20を伝搬する1550nmの光は、点欠陥22で共振し

線欠陥導波路②21へとパワーが移行し、出力ポート②26から出射される。

【0056】ヒーターに電流を流し温度を上げると、点欠陥の共振波長がずれるので、1550nmの光は直進し、出力ポート①25から出射される。このように本素子では、二つの出力ポートに出力を振り分けることができる。

【0057】また、本実施例の素子は波長分割多重通信において、可変波長分離器として用いることができる。その動作を、図14の(a)、(b)を用いて説明する。動作は、入力ポート①23から波長多重された光を入射し、多重された光のうち、任意の波長の光を出力ポート②26から出力し、残りの波長の光は出力ポート①25から出射するものである。

【0058】図14(a)に示す例では、 $\lambda_0 \sim \lambda_3$ の4つの波長の光を多重して入力ポート①23に入射する。室温状態で、点欠陥の共振波長を $\lambda_0$ にチューニングしておく、入力ポート①23から入射された光のうち、 $\lambda_1 \sim \lambda_3$ の波長の光はそのまま直進し出力ポート①25から出射される。一方、点欠陥の共振波長 $\lambda_0$ の光は、点欠陥を介して線欠陥導波路②21に移行し、出力ポート②26から出射される。

【0059】Cr薄膜ヒーターに通電しフォトニック結晶部を熱すると、点欠陥共振器の共振波長が変化し、出力ポート②26から取り出される波長が変化する。図14(b)には、出力ポート②26からの取り出し波長を $\lambda_1$ とした例を示した。

【0060】本素子形態における、ポリマー及びSiの温度と出力ポート②26からの取り出し波長の関係を図15に示す。例えば室温( $\Delta T=0$ )では1550nmの光が取り出され、 $\Delta T=50K$ で1553nmの光が取り出されることがわかる。このような、可変波長選択器は波長分割多重送信システムの中で、アド・ドロップ(add/drop)機能素子として用いることができる。

【0061】以上、本実施例を光スイッチ、可変波長選択器として動作させる例を示したが、同様の構成で光強度変調器として作用させることも可能である。

【0062】(実施例3)図16は、本願発明の光機能素子のさらに他の実施例を示した概念図である。図16に示す素子は、実施例2と同じ可変波長選択素子であるが、本実施例では加熱手段としてレーザー31を用いることを特徴とする。レーザーを用いることにより、局所加熱が可能となる。

【0063】図16に示すように、本例では孔の径を小さくすることで、点欠陥30を形成する。これによって点欠陥部にもポリマーが充填される。レーザーで信号光とは異なる波長の光を照射することにより、点欠陥部のポリマーを加熱する。熱せられたポリマーの屈折率が変化し、取り出し波長も変化する様子は、実施例2と同様である。



【0064】以上、実施例1、2ではフォトニック結晶の構造に、SOI基板上にSiをホスト材料とした二次元の円孔三角格子を用いた場合の例を示した。フォトニック結晶の構造は一次元、二次元、三次元のさまざまな構造が提案されており、そのどれを用いても同様な効果を得られるのは言うまでもない。

【0065】例えば、図17に示すのは、エアクラッド型Si円柱格子を使う二次元フォトニック結晶で構成される光素子の概念図である。本例の素子は、フォトニック結晶をSi円柱35で構成し、これを取り囲むポリマー36からなる。上部には薄膜ヒーター37が設けられ、下部はエアクラッドとなっている。

【0066】一般に、空気と半導体の組み合わせでは、半導体の柱状構造では、エアクラッド構造は不可能である。本例ではポリマーで埋め込むことで半導体柱は支えられるので、エアクラッド構造が可能となる。本例に限らず、ポリマー埋め込み構造とすることで、空気と半導体の場合よりも堅牢な素子構造が実現できる。

【0067】この他にも例えば、ポリマー薄膜と他の誘電体薄膜で積層構造を形成した一次元フォトニック結晶でも実施例1、2に記載と同等の機能を持つ素子が作製できる。

【0068】次に示す図18および図19は、実施例1に例示した可変分散補償器を用いた光モジュールの例である。

【0069】図18で示す例では、モジュールは、実施例1の可変分散補償素子40と、その光軸上のファイバ41とレンズ42、ペルチエ素子43、さらには温度制御装置44から構成されている。本例では、モジュール通過後の光信号を受信した受信装置から制御信号が下され、温度制御装置44はこれを受けて可変分散補償素子40のヒーターに流す電流（加熱用）あるいはペルチエ素子（冷却用）を制御して、所望の補償分散量に制御する。

【0070】図19には別のモジュールの例を示す。本例では、図18の構成に加え、素子の温度を測定する温度センサー45が備えられている。温度制御装置は外部からの制御信号を受けず、代わりに温度センサー45からの測定値に従って、素子の温度を所望の値に保つ。

【0071】次に、本発明による可変分散補償器を適用した光伝送システムを例示する。

【0072】図20は、実施例1に例示した可変分散補償器を用いた40Gbps/チャンネルの波長分割多重光伝送システムである。このシステムは、送信装置50、伝送ファイバ路51、受信装置52から構成される。

【0073】送信装置50は、各波長（チャンネル）ごとの電気-光変換器（E/O）53、波長多重器54、光送信増幅器55から構成されるが、これらは通例のものをを用いて十分である。使用波長は1.55 $\mu$ mを中心とした帯域とする。伝送ファイバ路には分散シフトファイ

バ51を用い、伝送距離は80kmである。

【0074】受信装置52は、光受信増幅器56、波長分離器57、実施例1に記載の本発明による可変分散補償器58、光-電気変換器（O/E）59から構成される。多重されて伝送された光パルスを経過した波長分離装置57で各波長に分割し、可変分散補償器58で各々のチャンネルで最適な分散補償を行う。

【0075】分散シフトファイバの分散は、1.53-1.6 $\mu$ mで数ps/nm/km以下である。伝送距離80kmで、最大±200ps/nm程度の分散を受けるが、その値はチャンネル（波長）によって異なる。実施例1の項で詳細に説明したように、可変分散補償器58は可変幅±150ps/nmであるから、全てのチャンネルに対して渡って分散をほぼ補償することが可能である。

【0076】次に、実施例1に記載の可変分散補償器と実施例2に記載の可変波長選択器を適用した光伝送システムの例を例示する。

【0077】システム構成を、図21に示す。このシステムは、送信装置50、伝送ファイバ路（図示省略）、中継装置60、受信装置52から構成される。送信装置50、受信装置52の構成は、実施例6で例示したものと同様の構成である。中継装置60は、光増幅器61、add用可変波長合波器63、電気-光変換器62、drop用可変波長分離器64、可変分散補償器58、光-電気変換器59を少なくとも備える。本システムに於いて中継装置は、任意の波長の光信号を伝送路に加え、また任意の波長の光信号を受信する機能を有する。

【0078】電気-光変換器62は、望ましくは波長可変レーザーを備え、所望の波長の光信号を発生する。発生した光信号は、実施例2に記載の可変波長選択器と同じ構造をもつadd用可変波長分離器63にて合波される。合波の動作は、実施例2で説明した動作の逆過程である。

【0079】一方、drop用可変波長分離器64、可変分散補償器58、光-電気変換器59で構成される系は、特定の波長の信号を選択し、電気信号に変換するためのものである。波長多重された光信号は、drop用可変波長分離器64によって、実施例2で説明したプロセスに従って分離され、分散補償器58によって波形歪を補償され、受信される。

【0080】このようなadd/drop機能を備えた中継器は、光通信システムのフレキシビリティを高める。

【0081】本発明は、以下に示すような構成を含む。

【0082】（1）光機能素子が、屈折率の異なる二種類以上の材料を周期的に配列した構造を有し、前記材料の少なくとも一つがポリマーであり、前記ポリマーの一部分及び全体の温度を変えることができる手段を有することを特徴とする光機能素子。

【0083】（2）前記（1）の構成において、温度変

化に伴う前記ポリマーの体積変化を可能とするように、ポリマーが密閉充填されない構造であることを特徴とする光機能素子。

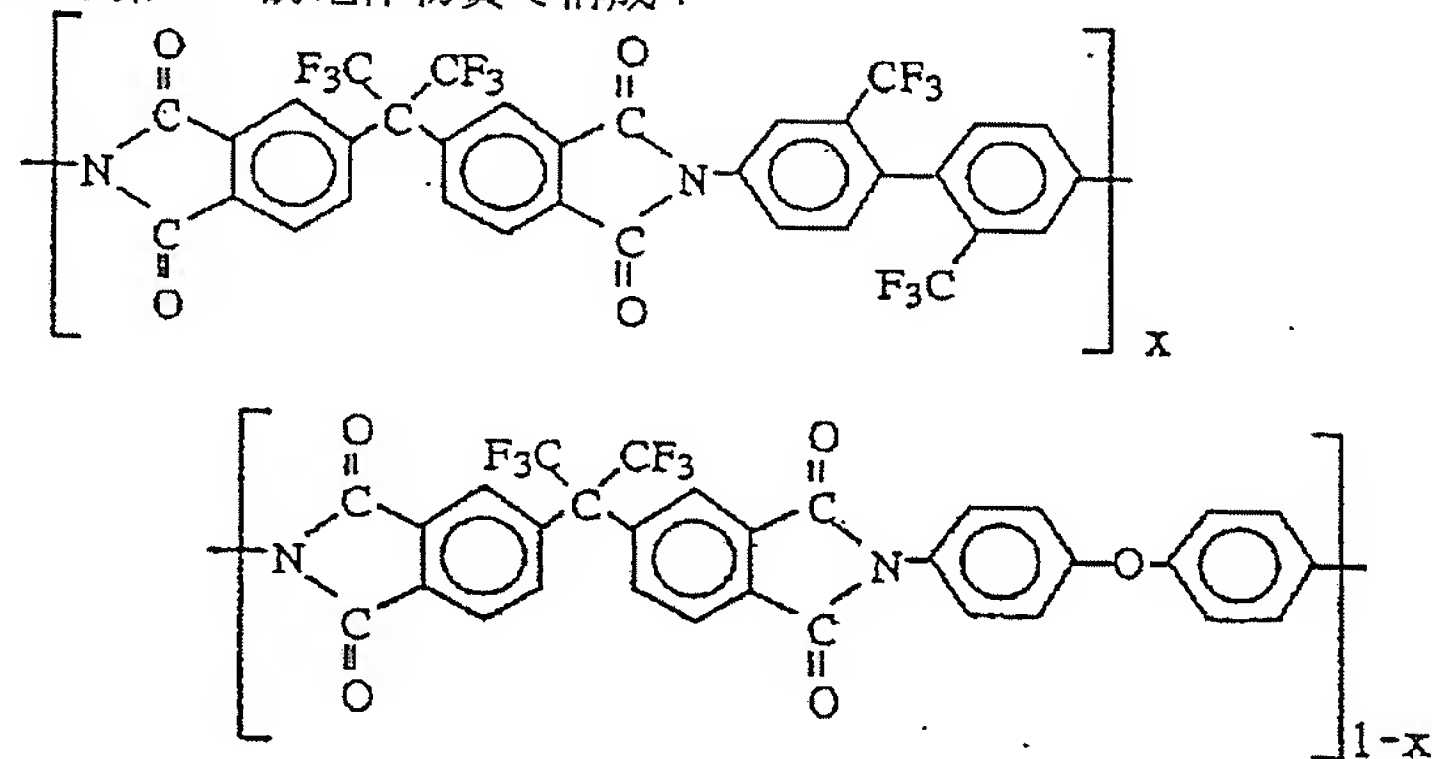
【0084】(3) 前記(1)の構成において、前記ポリマーに、加熱されると可塑性が増す性質を有するポリマーを用いることを特徴とする光機能素子。

【0085】(4) 前記(1)の構成において、使用温度で理想的な周期構造を形成するように、ポリマーの充填を、加熱時のポリマーの体積膨張相当量少なくした構造を持つことを特徴とする光機能素子。

【0086】(5) 前記(1)の構成において、前記周期構造が少なくとも二種類の薄膜を積層した積層薄膜構造であって、該薄膜の少なくとも一種がポリマーであることを特徴とする光機能素子。

【0087】(6) 前記(1)の構成において、前記周期構造が基板に垂直に伸びた第一の誘電体物質の柱状構造と該柱状構造の間を埋める第二の誘電体物質で構成された二次元周期構造であり、柱状構造を構成する第一誘電体物質がポリマーであることを特徴とする光機能素子。

【0088】(7) 前記(1)の構成において、前記周期構造が基板に垂直に伸びた第一の誘電体物質の柱状構造と前記柱状構造の間を埋める第二の誘電体物質で構成\*



で表される、フッ素化ポリイミドであることを特徴とする光機能素子。

【0096】(14) 前記(8)の光機能素子において、作製時に金属膜をエッチングマスクとして用い、前記金属膜を前記(9)の薄膜ヒーターとして用いることを特徴とする光機能素子。

【0097】(15) 前記(1)の光機能素子が、光パルス伝送路における伝送媒体の波長分散を補償する機能を有し、分散補償量が温度変化によって制御される可変分散補償器であることを特徴とする光機能素子。

【0098】(16) 前記(1)の光機能素子が、光パルス伝送路を空間的に切り替えるスイッチングの機能を有し、スイッチング動作が温度制御によってなされる光スイッチであることを特徴とする光機能素子。

【0099】(17) 前記(1)の光機能素子が、波長多重された光パルスから特定の波長の光パルスだけを選

\* された二次元周期構造であり、第二誘電体物質がポリマーであることを特徴とする光機能素子。

【0089】(8) 前記(1)の構成においてポリマーの柱状構造の直径 $d$ と、柱の高さ $h$ と、前記ポリマーの前駆体物質の接触角 $\theta$ との関係が、 $\theta < \tan^{-1}(d/h)$ を満たすことを特徴とする光機能素子。

【0090】(9) 前記(1)の構成において、前記温度を変える手段が薄膜ヒーターであることを特徴とする光機能素子。

10 【0091】(10) 前記(9)の構成において、前記薄膜ヒーターがポリマーを覆わない構造であることを特徴とする光機能素子。

【0092】(11) 前記(1)の構成において、前記温度を変える手段がレーザーであることを特徴とする光機能素子。

【0093】(12) 前記(1)の構成において、前記温度を変える手段がペルチェ素子であることを特徴とする光機能素子。

20 【0094】(13) 前記(1)の構成において、前記ポリマーが、下記の化学式

【0095】

【化2】

択して空間的に分離する波長分離器の機能を有し、空間的に分離する波長の選択が温度制御によってなされる可変波長分離器であることを特徴とする光機能素子。

40 【0100】(18) 前記(1)の光機能素子が、光パルスを遅延する機能を有し、前記遅延時間が温度によって制御される可変遅延素子であることを特徴とする光機能素子。

【0101】(19) 前記(1)の光機能素子が、光パルスの強度を変化する機能を有し、強度変化が温度によって制御される光強度変調器であることを特徴とする光機能素子。

【0102】(20) 前記(1)の光機能素子がの周期構造を作製するプロセスで、ポリマー前駆体を塗布・加熱重合しポリマー層を形成する際に、ポリマー前駆体を塗布した後、加熱する前に減圧過程を設けることを特徴とする素子形成プロセス。



【0103】(21) 前記(1)の光機能素子の周期構造を作製するプロセスにおいて、ポリマー前駆体を塗布・加熱重合しポリマー層を形成する際に、ポリマー前駆体を塗布した後、加熱する前に減圧過程を設けることを特徴とする素子形成プロセス。

【0104】(22) 前記(6)又は(7)の光機能素子の周期構造を作製するプロセスにおいて、ポリマー前駆体を塗布・加熱重合しポリマー層を形成する際に、まず所望の量より厚いポリマー層を形成し、しかる後にドライエッチングによって所望の厚さまでエッチングすることを特徴とする素子形成プロセス。

【0105】(23) 前記(1)の光機能素子を備えた光モジュールが、温度調整機構を備え、雰囲気温度に寄らずに素子の温度を所望の値に保つ機能を有することを特徴とする光モジュール。

【0106】(24) 前記(1)乃至(18)のいずれかに記載の光機能素子を、送信器、中継器、受信器のいずれかもしくは複数箇所に使用したことを特徴とする光伝送システム。

【0107】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、超小型で高機能なフォトニック結晶を用いた光機能素子を実現することができる。更に、本発明により、安価で信頼性の高い光伝送システムを構築することが出来る。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の概念を示す概観図。

【図2】二次元フォトニック結晶の例を示した図。

【図3】図2に記載の二次元フォトニック結晶に対応するフォトニックバンド図。

【図4】ポリイミドの屈折率の温度依存性を示したグラフ。

【図5】本発明による実施例1を説明する概観図。

【図6】図5のPP'線分での断面を示す図。

【図7】図5のPP'線分での断面を示す図。

【図8】本発明による光機能素子を作製するプロセス(a)～(g)の説明図。

【図9】ポリマーを微細な孔に埋めるときの条件を説明した図。

【図10】実施例1の分散補償器における、波長と分散量の関係を示した図。

【図11】屈折率変化と個々の微小共振器の共鳴周波数

の関係を示した図。

【図12】実施例1の分散補償器における、温度変化と分散量の変化を示した図。

【図13】本発明による実施例2を説明する概観図。

【図14】本発明の実施例2の可変波長分離器としての動作を説明する図。

【図15】実施例2の可変波長分離器における、温度と選択波長の関係を示した図。

【図16】本発明による実施例3を示し、温度変更手段としてレーザを用いた例を示した図。

【図17】本発明において、二次元フォトニック結晶として、エアクラッド型Si円柱格子を使う例を示した図。

【図18】実施例1に記載の可変分散補償器を実装した光モジュールの例を示す図。

【図19】実施例1に記載の可変分散補償器を実装した光モジュールの他の例を示す図。

【図20】実施例1に記載の可変分散補償器を用いた波長分割多重光伝送システムの構成を示す図。

【図21】実施例1に記載の可変分散補償器および実施例2に記載の可変波長選択器を用いた波長分割多重光伝送システムの構成を示す図。

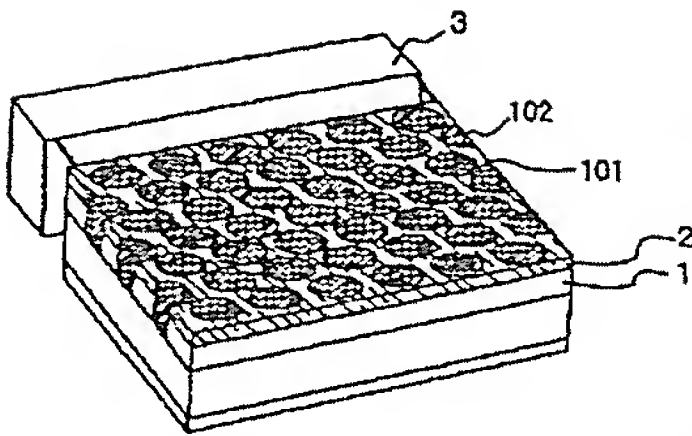
【符号の説明】

1…ポリマー埋め込みフォトニック結晶、2…薄膜ヒーター、3…温度調整器、4…入力導波路、5…出力導波路、6…点欠陥、7…ポリイミド、8…Cr膜、9…SOI基板、10…Si層、11…SiO<sub>2</sub>層、12…下地Si層、13…レジスト、20…線欠陥導波路①、21…線欠陥導波路②、22…点欠陥、23…入力ポート①、24…入力ポート②、25…出力ポート①、26…出力ポート②、30…Si円柱、31…ポリイミド埋め込み層、32…薄膜ヒーター、35…点欠陥、36…レーザ、40…可変分散補償素子、41…光ファイバ、42…光学レンズ、43…ペルチエ素子、44…温度調節器、45…温度測定器、50…送信装置、51…伝送ファイバ路、52…受信装置、53…電気-光変換器(E/O)、54…波長多重器、55…光送信増幅器、56…光受信増幅器、57…波長分離器、58…波長分散補償器、59…光-電気変換器(O/E)、60…中継器、61…光増幅器、62…電気-光変換器(E/O)、63…波長多重器、64…可変波長分離器、65…波長分散補償器、101…孔部、102…ポリマー。



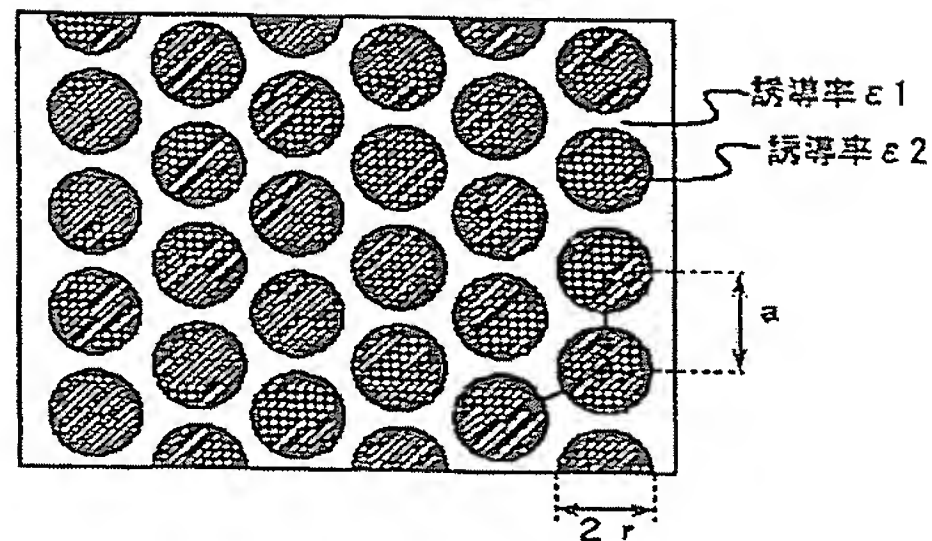
【図1】

図 1



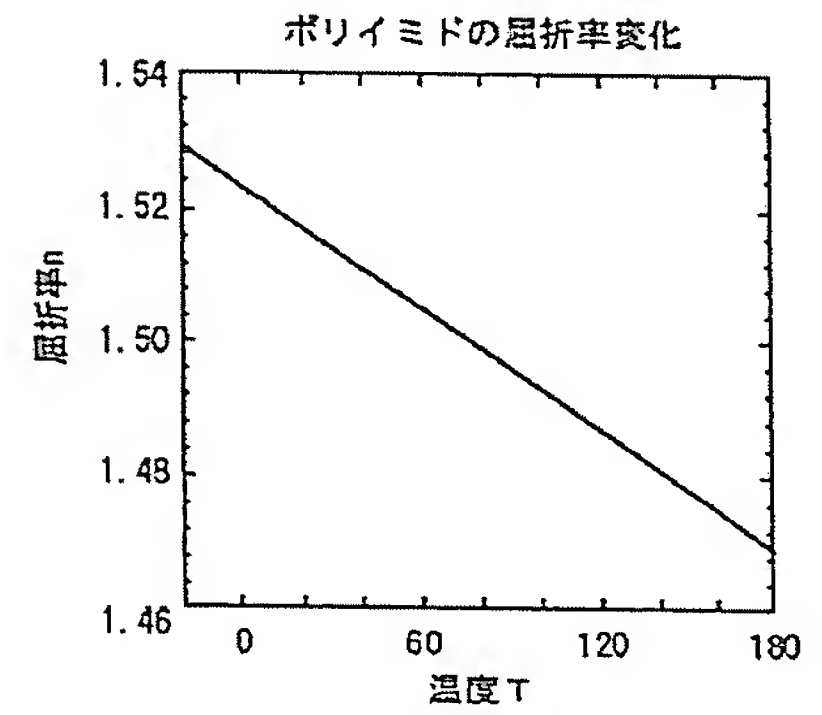
【図2】

図 2



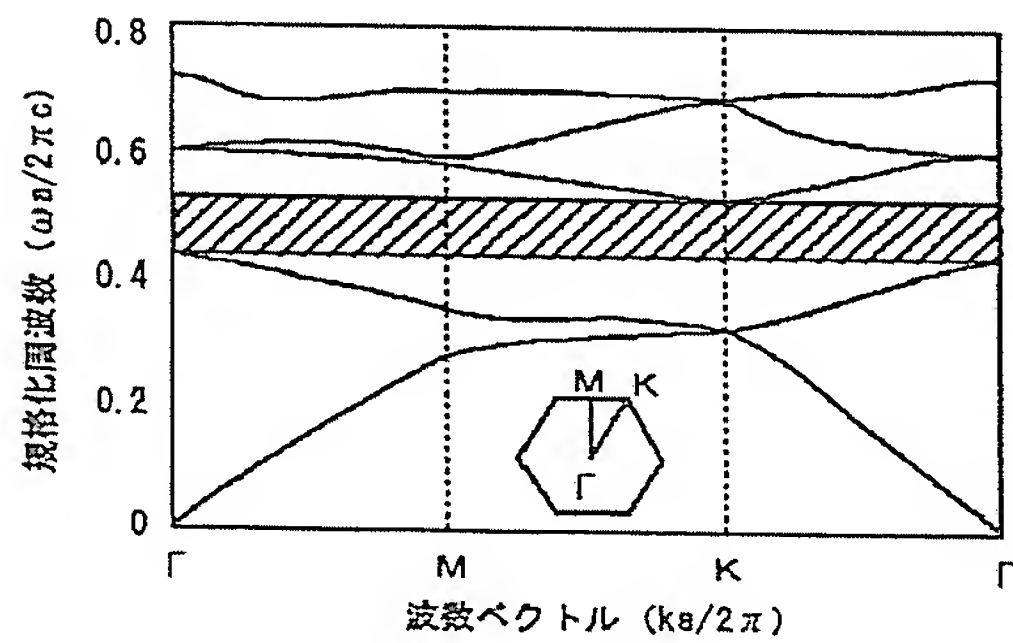
【図4】

図 4



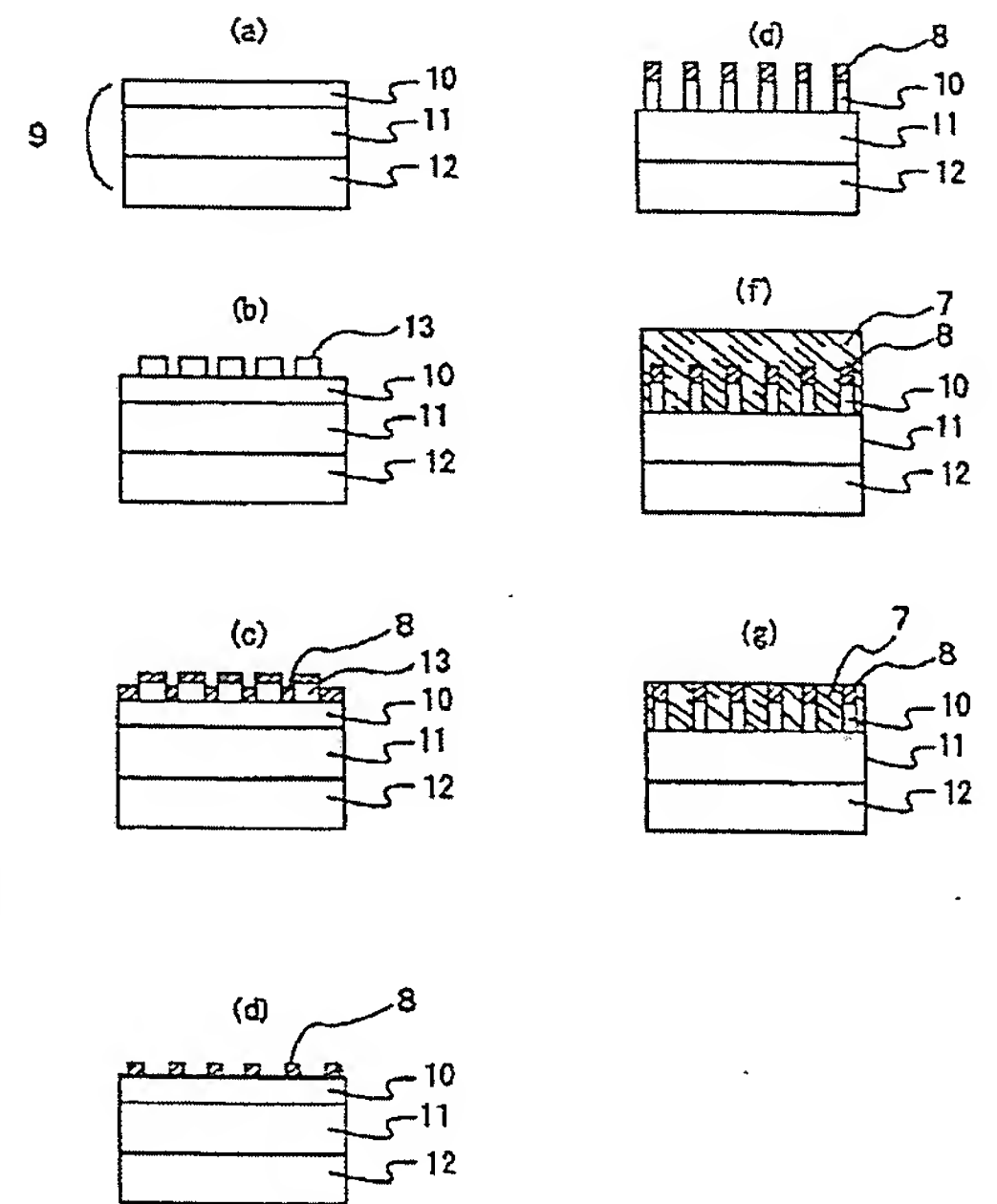
【図3】

図 3



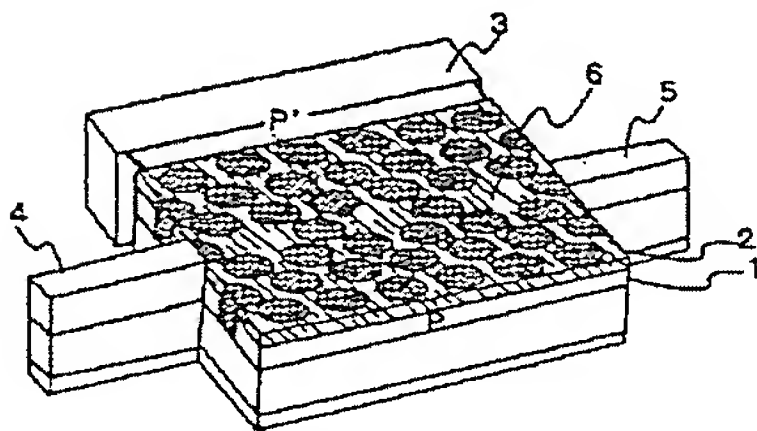
【図8】

図 8



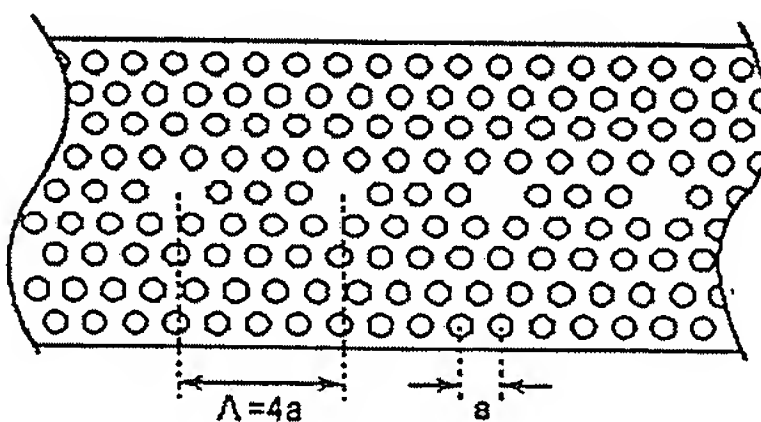
【図5】

図 5



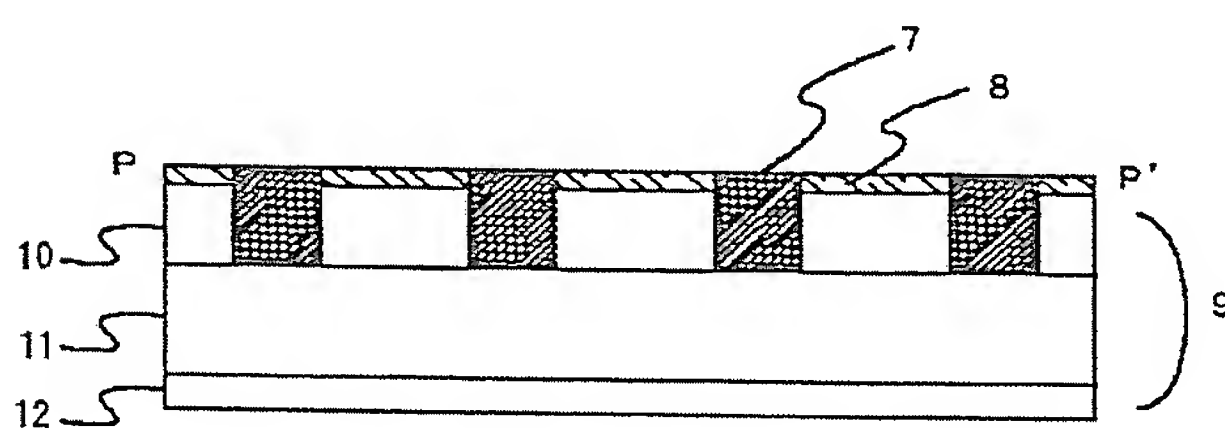
【図6】

図 6



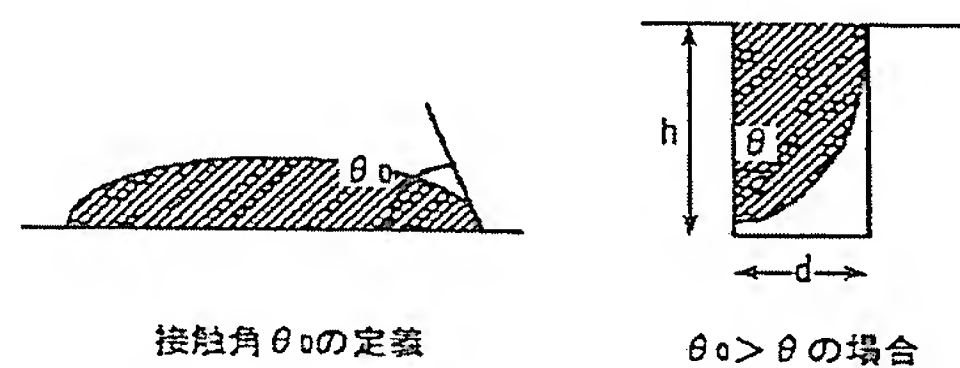
【図7】

図 7



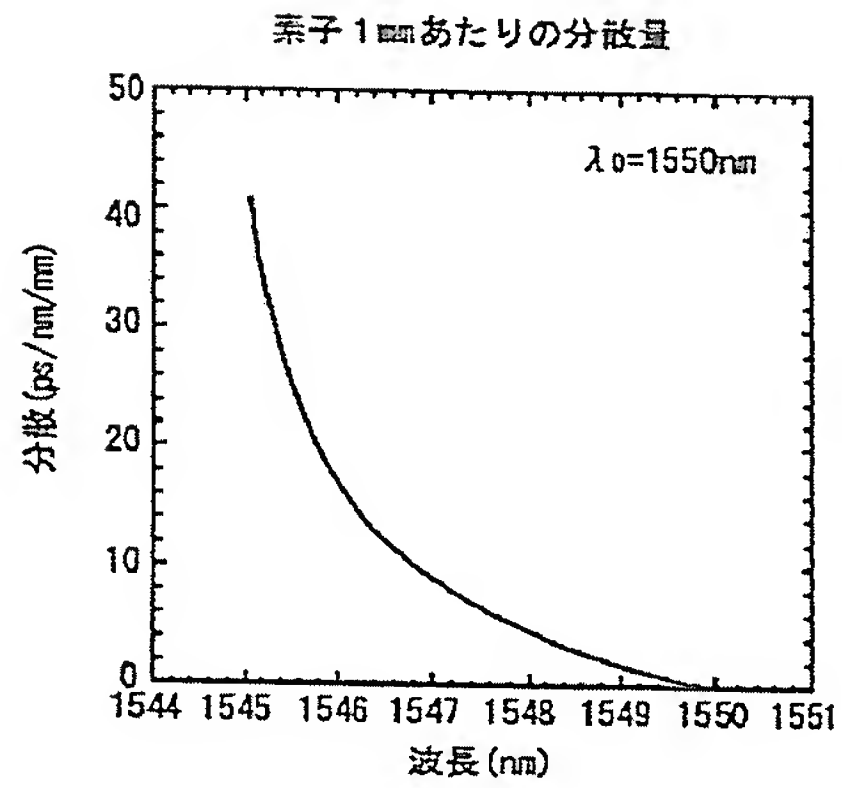
【図9】

図 9



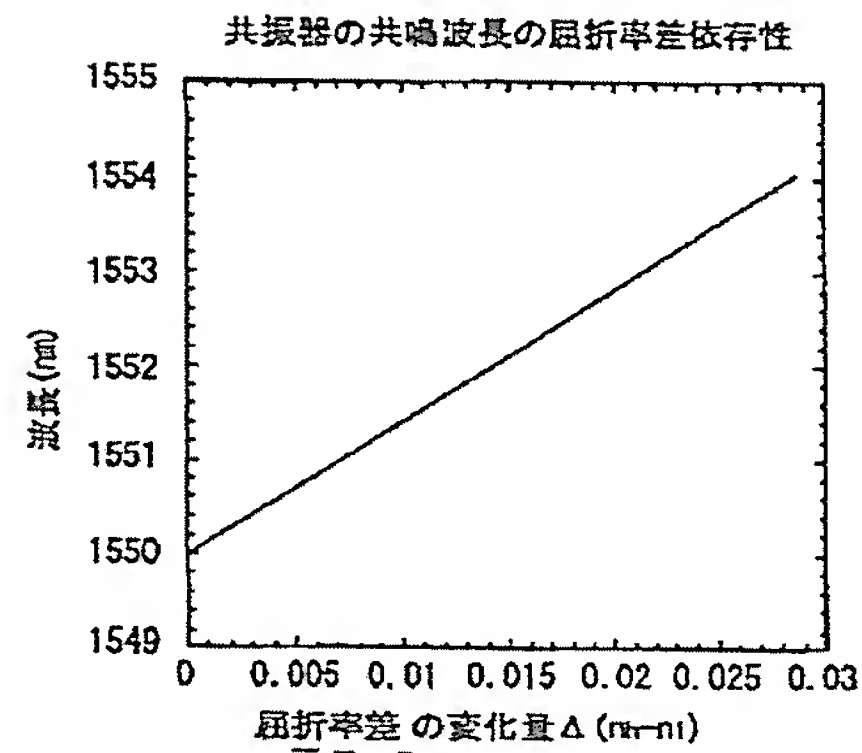
【図10】

図 10



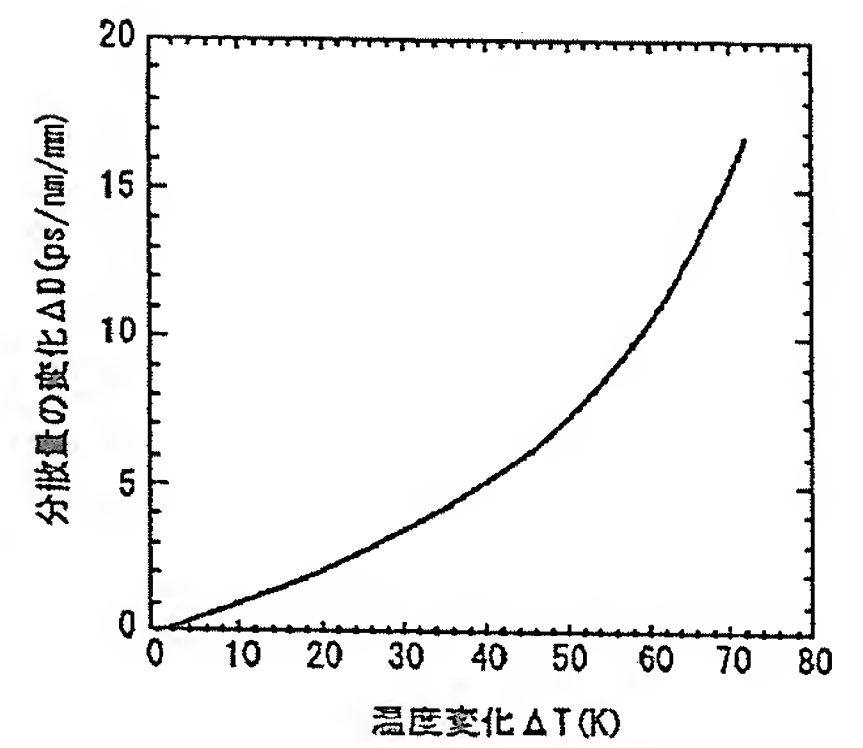
【図11】

図 11



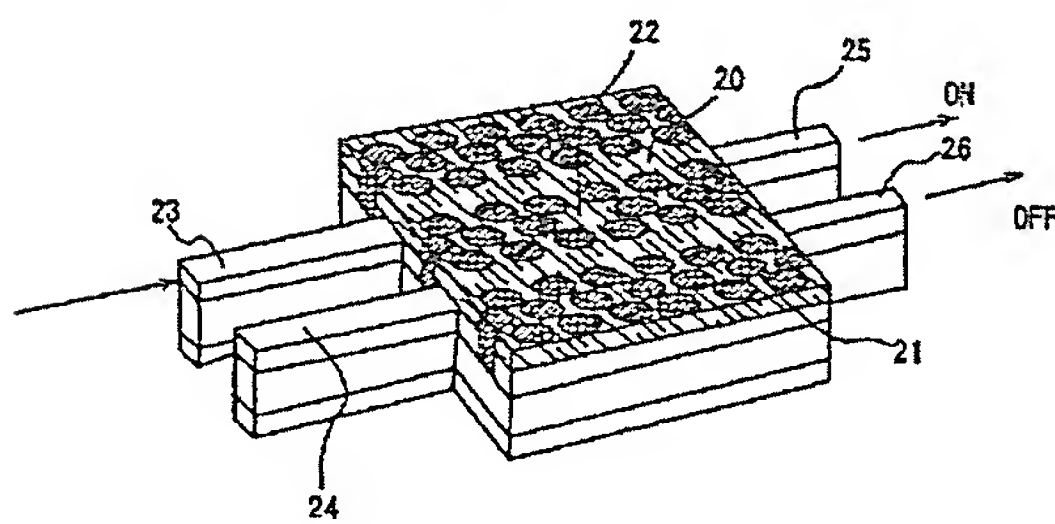
【図12】

図 12



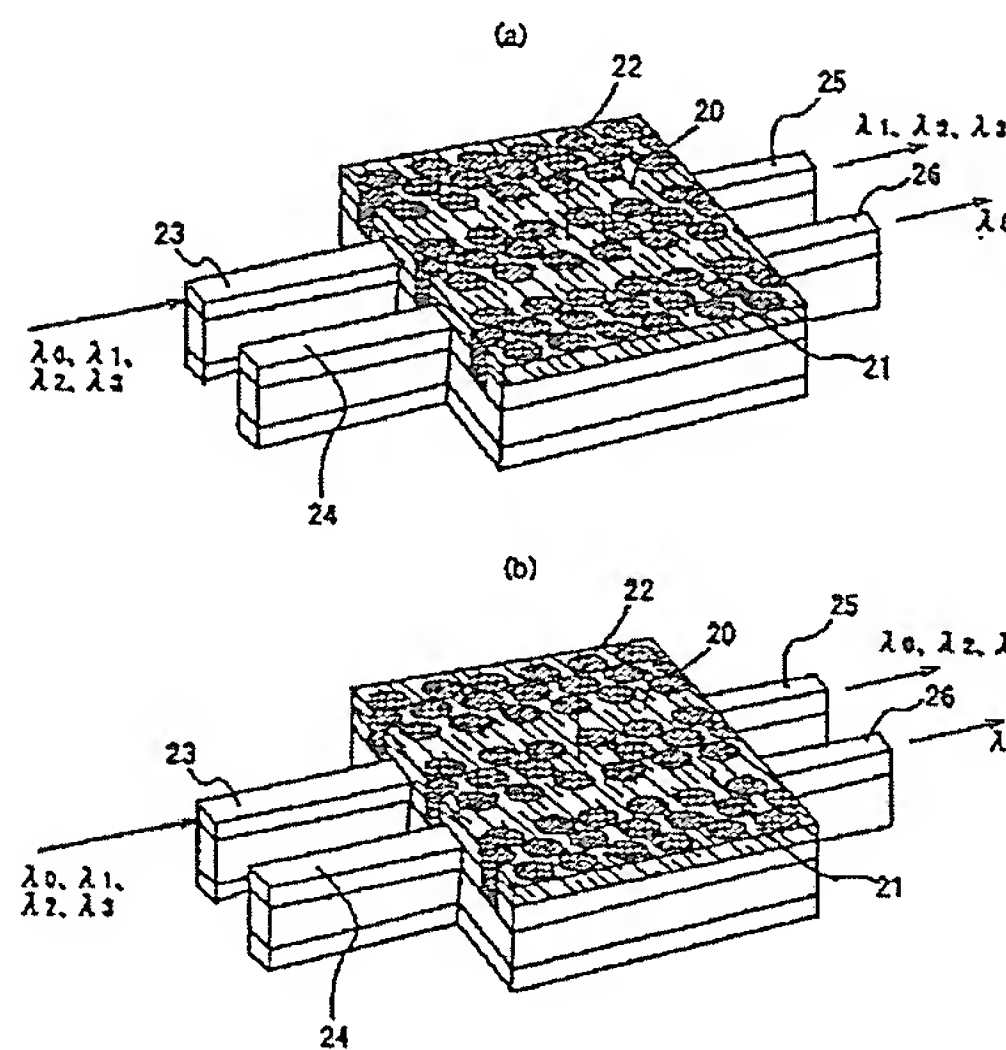
【図13】

図 13



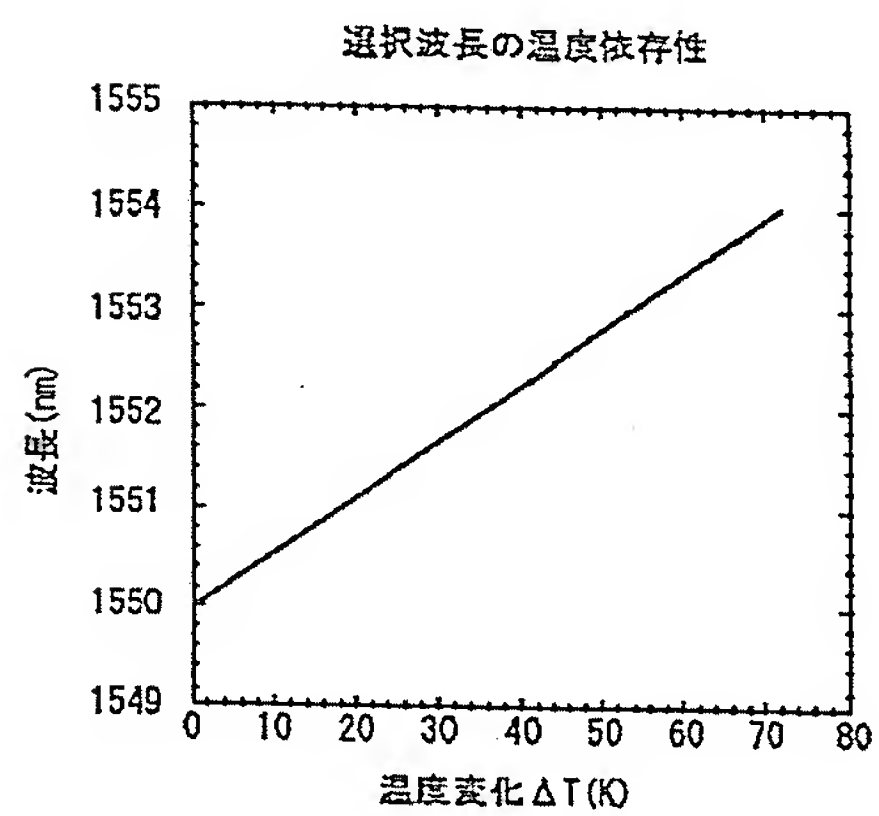
【図14】

図 14



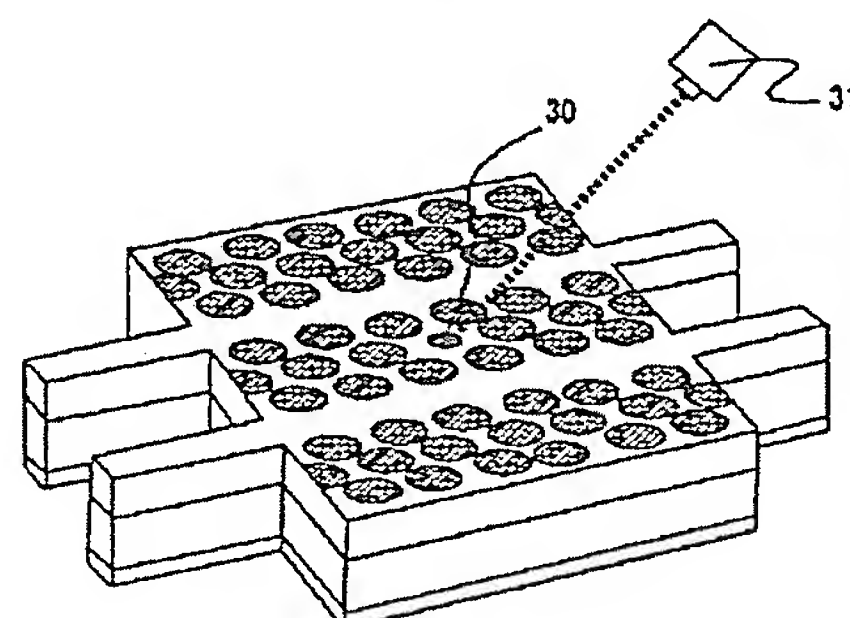
【図15】

図 15



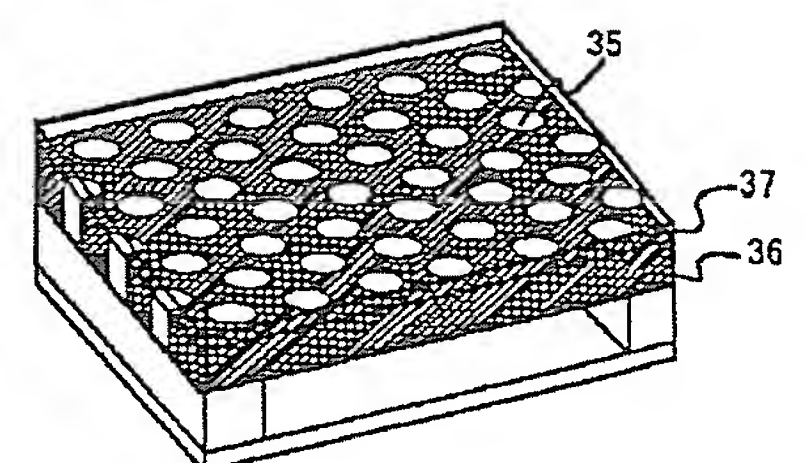
【図16】

図 16

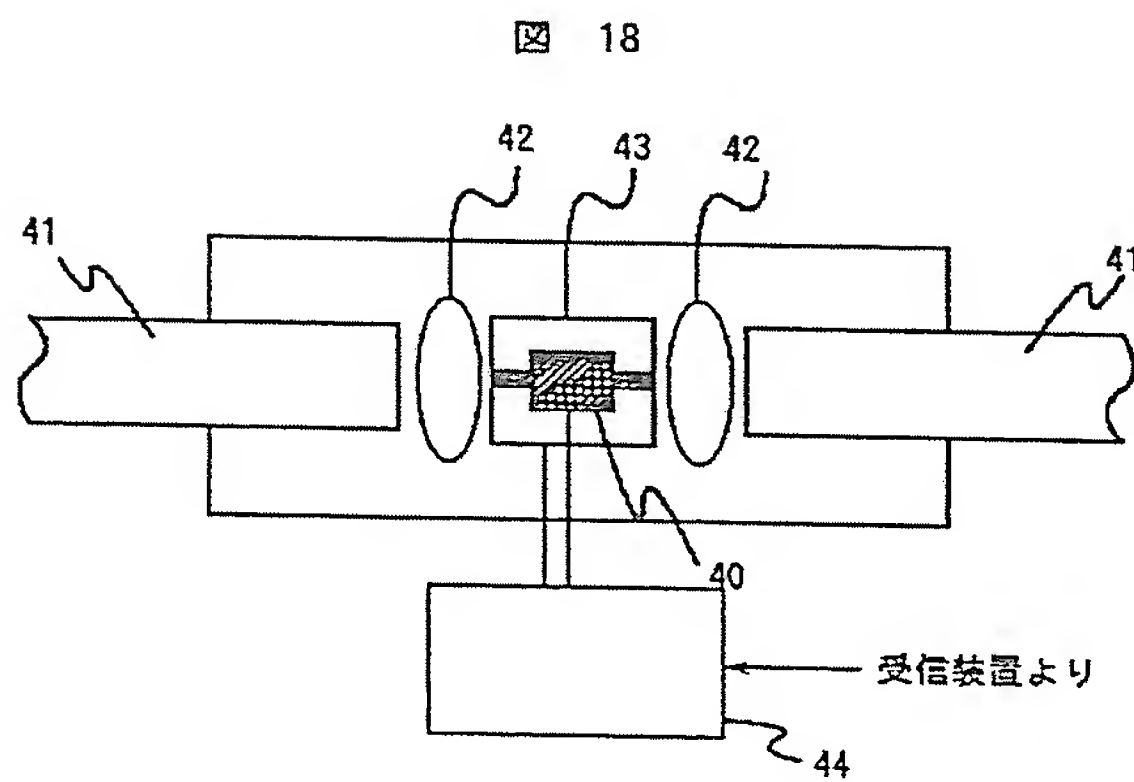


【図17】

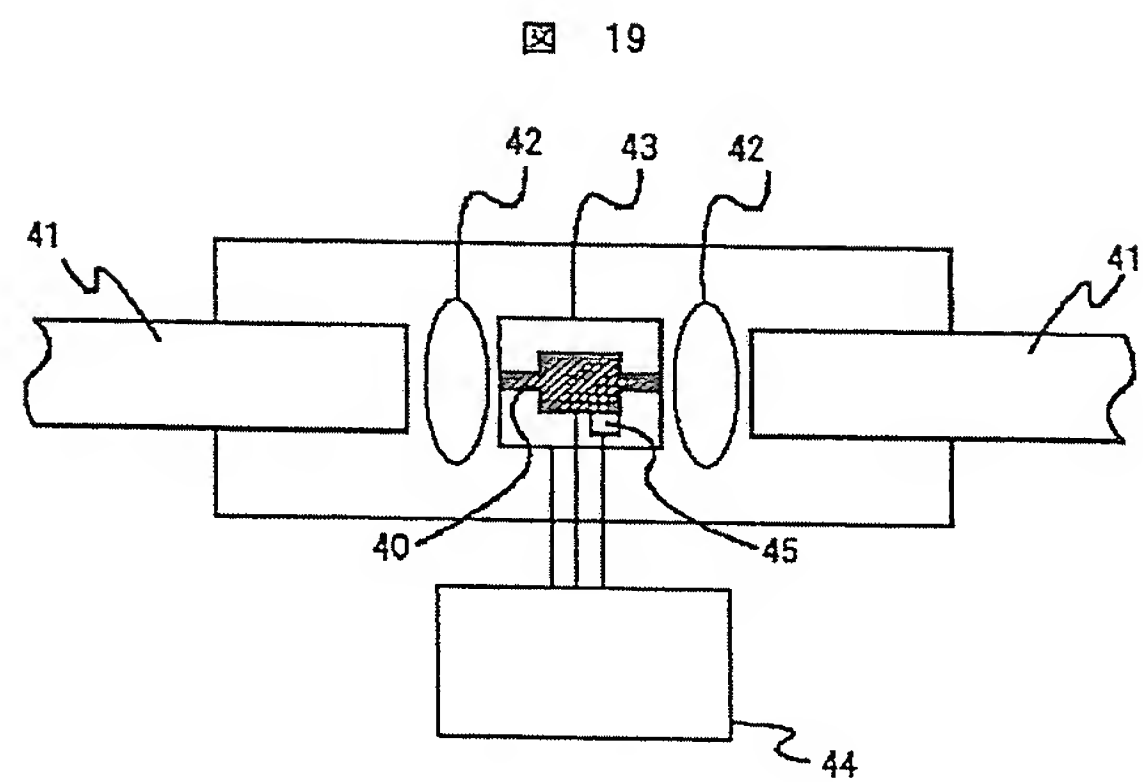
図 17



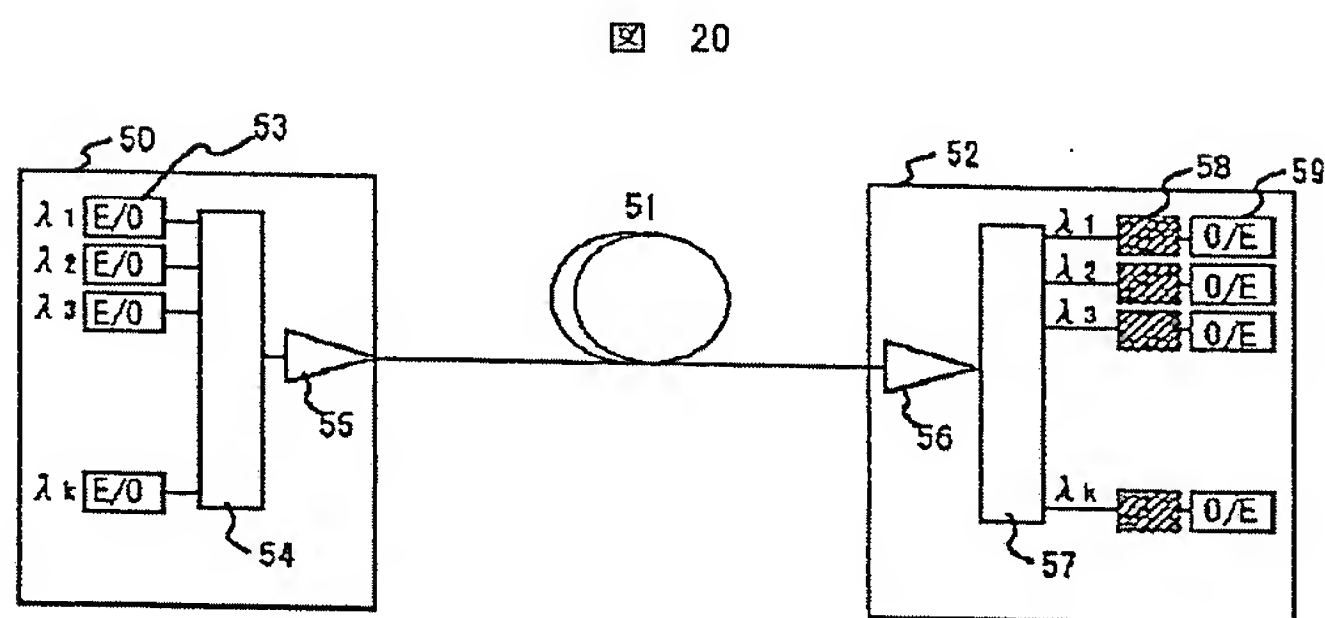
【図18】



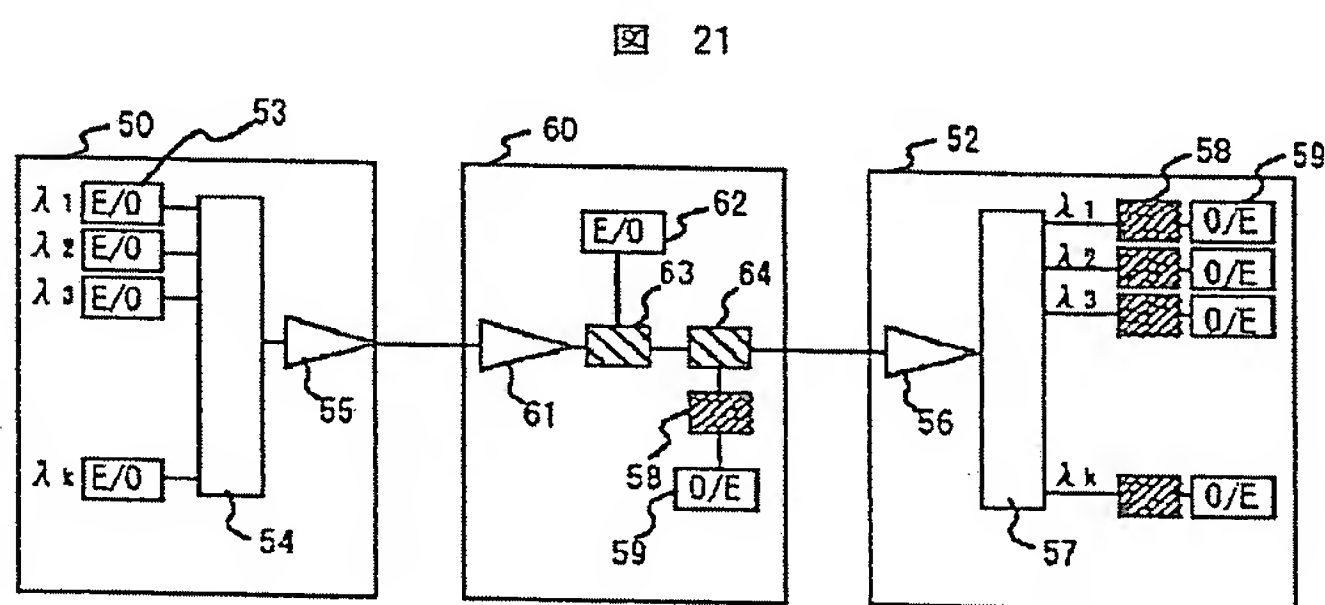
【図19】



【図20】



【図21】



フロントページの続き

(72)発明者 李 英根  
埼玉県比企郡鳩山町赤沼2520番地 株式会  
社日立製作所基礎研究所内

Fターム(参考) 2H047 KA02 NA01 PA02 PA04 PA21  
PA24 QA01 QA05 RA08 TA11  
2H079 AA06 AA12 BA01 BA03 CA05  
DA03 DA07 EA03 EB27  
2K002 AA02 AB04 BA13 CA06 CA13  
DA07 EA04 HA11